

Nouvelles techniques non invasives d'évaluation de la qualité de l'œuf



Kristof Mertens[#], Catalin Perianu[#], Bart Kemps[#], Bart De Ketelaere[#], Eddy Decuypere^{*} and Josse De Baerdemaeker[#]

[#] Katholieke Universiteit Leuven, Department of Biosystems, Division of Mechatronics, Biostatistics and Sensors (MeBioS), Kasteelpark Arenberg 30 bus 2456, 3001 Heverlee, Belgique

^{*} Katholieke Universiteit Leuven, Department of Biosystems, Division Livestock-Nutrition-Quality, Kasteelpark Arenberg 30 bus 2456, 3001 Heverlee, Belgique

Auteur Correspondant: kristof.mertens@biw.kuleuven.be

I. INTRODUCTION

Les œufs des oiseaux sont bien sûr un moyen de reproduction pour ces espèces, mais ils sont aussi un élément de base dans le régime alimentaire de l'Homme. Cependant, les œufs doivent rivaliser sur le marché avec un nombre croissant d'autres produits de l'industrie alimentaire moderne, en surmontant notamment certains inconvénients. Par exemple, les œufs sont des produits instables, dont la qualité se détériore au cours du stockage. En outre, les 3 composantes de l'œuf (coquille, albumen et jaune) présentent une variabilité naturelle liée principalement à l'âge de la poule qui ne correspond pas aux exigences du consommateur contemporain. Des méthodes de production planifiée et des procédures efficaces de contrôle de la qualité permettent de limiter la variation des œufs en triant les œufs proposés au consommateur (« œuf coquille » également appelé « œuf de table ») ; elles sont donc fondamentales pour un marketing performant.

Les mesures de qualité de l'œuf ne devraient pas se limiter à informer le consommateur sur les caractéristiques macroscopiques (calibre) et l'origine de l'œuf (n° d'identification, date de ponte). Les mesures non destructives, aussi bien que destructives, peuvent en effet permettre la sélection d'œufs offrant une sécurité accrue et donc une meilleure garantie de qualité pour le consommateur. Ces mesures peuvent par ailleurs aider les producteurs, car elles fournissent des informations sur les performances globales de production incluant la qualité du produit et donc sur la gestion de l'élevage (état de santé du troupeau, conditions environnementales de l'élevage...).

Le premier pas vers une bonne évaluation de la qualité des œufs est le développement de capteurs efficaces. Une inspection automatisée a des avantages certains, comparée à un contrôle manuel : plus grande fiabilité, meilleure productivité, accès grâce aux équipements à ce que l'œil ne peut pas percevoir (au travers de la coquille). Des technologies nouvelles, rapides, complètement automatisées et fiables, offrent également la possibilité d'évaluer la qualité complète d'un lot (contrôle de tous les œufs d'un lot), et non par échantillonnage. Les facteurs décisifs pour le choix des techniques de contrôle automatisé incluent la capacité à assurer des mesures fiables, la vitesse de mesure, le coût des instruments et l'adéquation de triage exigée. La disponibilité d'ordinateurs puissants et de nouvelles technologies de détection a permis de développer des technologies rapides, objectives et précises (Bamelis et al., 2004 ; De Ketelaere et al., 2004). Cette revue présente les techniques récemment développées (ou bien avancées) pour évaluer de nombreux aspects de la qualité de l'œuf de consommation. Pour une présentation plus exhaustive, nous recommandons la lecture du chapitre 7 de l'ouvrage « *Science et technologie de l'œuf et des ovoproduits vol. 1* » (Mertens et al., 2010b).

II. QUALITE DE LA COQUILLE

D'un point de vue biologique, la coquille de l'œuf a pour rôle de protéger l'embryon. Elle permet aussi l'échange des gaz entre l'embryon et l'environnement. Pour l'œuf considéré en tant que produit alimentaire, la coquille agit comme un emballage naturel, facilitant le transport de son contenu et le protégeant d'une pénétration de bactéries pathogènes. Pour le consommateur, l'aspect visuel de la coquille est essentiel ; les œufs sales, pâles ou inégalement colorés sont ainsi rejetés. De plus, les œufs à coquilles sales augmentent le risque de contamination bactérienne.

1. Couleur de la coquille

La couleur de la coquille n'a aucune influence sur la valeur nutritive de l'œuf, mais celle-ci correspond à des préférences particulières du consommateur, devenant ainsi un indice qualitatif de grande importance économique (Wei et Bitgood, 1989). La coquille des œufs de table peut être brune foncée, blanche ou intermédiaire entre ces deux extrêmes. La couleur brune est principalement due aux pigments protoporphyrine-IX, La plupart de ces pigments sont localisés dans la cuticule de l'œuf, mais ils peuvent aussi être retrouvés pour 1/3 en superficie de la coquille elle-même (Lang et Wells, 1987; Kennedy et Vevers, 1973).

Dans le cas des œufs bruns, la couleur de la coquille s'estompe au fur et à mesure du vieillissement des poules, et ce pour des raisons encore inconnues. Par ailleurs, pour une même population de poules pondant des œufs bruns, il peut y avoir une grande diversité de couleurs. La couleur de la coquille dépend en effet avant tout de facteurs génétiques, mais elle peut aussi être influencée par des maladies, une mauvaise conduite d'élevage ainsi que des contraintes environnementales particulières. Par exemple, les maladies virales touchant l'appareil reproducteur conduisent à des coquilles pâles, tandis que les contraintes environnementales se traduisent par une plus grande densité de taches (Butcher et Miles, 2003). En conditions normales, la densité des taches sur la coquille est définie génétiquement pour chaque individu, de sorte qu'on peut souvent identifier chaque poule pondeuse par l'analyse de la pigmentation de ses œufs.

1.1. Mesure par spectrométrie transmission VIS/NIR

La spectroscopie dans le visible (VIS) et le proche infra-rouge (NIR), c'est-à-dire à des longueurs d'onde comprises entre 405 et 950 nm, est une technique largement utilisée pour évaluer la qualité interne de produits agricoles (Williams et Norris, 1987). La spectroscopie NIR est basée sur la mesure des vibrations provoquées par la traction et la torsion des liaisons hydrogène-carbone, hydrogène-oxygène et hydrogène-azote. L'analyse des spectres d'absorption NIR fournit donc des renseignements quantitatifs sur des constituants tels que l'eau et les protéines (Giangiacomo et Dull, 1986). Les mesures de type NIR offrent plusieurs avantages : elles sont rapides, non destructives, exactes, fiables, sans contact avec l'aliment et économiques. L'absence de contact avec l'aliment rend cette technique a priori particulièrement intéressante pour évaluer la qualité de l'œuf, car cela limite les risques de contamination microbiologique. Par ailleurs, la rapidité de la mesure fait qu'un grand nombre d'œufs peut être analysé sur un court intervalle de temps, ce qui permet d'envisager un contrôle de l'ensemble des œufs

Récemment, Mertens et al. (2010a) ont présenté une nouvelle méthode pour mesurer la couleur des œufs marrons basée sur des spectres de spectrométrie de transmission VIS/NIR. Ils ont cette nouvelle mesure, la « *Valeur de Couleur Transmise* » (VCT). Ils utilisent la valeur de transmission relative à la longueur d'onde auquel le pigment de la couleur marron, protoporphyrine-IX, a une absorbance maximale, à savoir 643 nm. La VCT est déterminé par :

$$VCT = \frac{T_{643}}{T_{610}}$$

avec T_{643} la valeur de transmission relative à 643 nm et T_{610} à 610 nm. La longueur d'onde 610 nm a été utilisée comme référence pour corriger les différences entre spectres bruts qui intègrent, entre autres l'épaisseur de coquille, la couleur du jaune de l'œuf, la taille de l'œuf... Le travail de Bamelis (2003) a démontré que la longueur d'onde de 610 nm n'était pas influencée par des composants de l'œuf. Les résultats de Mertens et al. (2010) démontrent que le VCT n'est pas seulement une mesure de couleur absolu, mais aussi un indicateur de la santé et de l'état de stress des poules pondeuses. Aussi bien le stress de chaleur qu'une infection de la bronchite infectieuse modifie significativement le VCT : le VCT augmente lorsque les œufs sont moins pigmentés donc plus pâles. Des publications de Siefferman et al. (2006), Moreno et al. (2006) et Martinez de la Puente et al. (2007) concluent que l'évolution de la couleur de coquille et du design des taches de pigmentations sont des indicateurs de stress ou de l'état de santé générale des oiseaux.

1.2. Mesure par spectrométrie de fluorescence

Le phénomène de fluorescence correspond à l'émission d'un photon, lors du retour d'un état vibratoire maximal à un état vibratoire minimal d'un électron préalablement excité par absorption de lumière. Les émissions maximales sont observées à 635 nm et 672 nm après une excitation dans l'ultra-violet à des longueurs d'onde de 405, 510, 540 et 557 nm. Ces valeurs de longueur d'onde d'émission sont principalement liées au contenu en protoporphyrines. Pour évaluer la fraîcheur d'un œuf, seule la valeur à 672 nm est utilisée. La fluorescence de la coquille d'un œuf récemment pondu est plus importante que celle d'un œuf stocké plus longtemps, car elle est directement liée à la quantité de porphyrine présente à la surface de la coquille (Karoui et al., 2006).

2. Solidité de la coquille

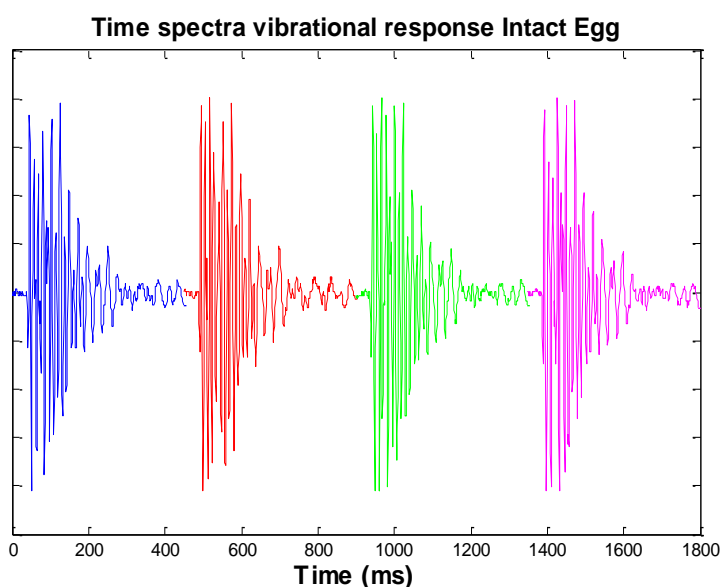
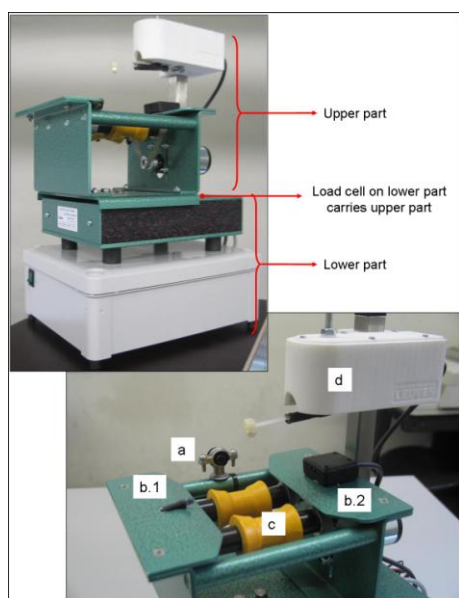
Il est très important que la coquille des œufs de consommation offre une grande résistance mécanique afin de prévenir les fractures résultant des impacts survenus tout au long de la chaîne de production (Bain, 1990). Les œufs cassés sont en effet à l'origine de pertes économiques pour deux types de raisons : d'une part, ils ne peuvent plus être vendus en catégorie A d'autre part, la présence de fêlures accentue le risque de contamination bactérienne de l'œuf lui-même, ainsi que des œufs voisins. Ce défaut représente donc une menace en termes de qualité externe, de qualité interne et même de sécurité alimentaire (Mertens et al., 2005). La fissuration de la coquille est directement liée à sa résistance intrinsèque. Cette résistance mécanique est elle-même reliée à l'épaisseur de la coquille et à son organisation structurale. Plusieurs techniques et instruments ont été développés pour l'évaluation de la résistance de la coquille.

La solidité de la coquille diminue avec le vieillissement des troupes de pondeuses. Cela peut être dû à l'augmentation de la taille de l'œuf et aux modifications du métabolisme conduisant à une réduction de l'approvisionnement en minéraux précurseurs du carbonate de calcium. En conséquence, un nombre beaucoup plus important d'œufs sont cassés en fin de période de ponte, ce qui rend la manipulation des œufs provenant de troupes âgées plus délicate par rapport à ceux des troupes plus jeunes.

En cours de temps, plusieurs méthodes ont été développées et peuvent être catégorisées en deux groupes : des mesures directes et des mesures indirectes. Les mesures directes les plus connues sont les tests de compression quasi-statique entre deux plans parallèles ou à l'aide d'un poinçon pour les tests de ponction. Ces deux techniques déterminent la force maximale (F_{max}). Des mesures indirectes sont l'épaisseur de la coquille (par un micromètre classique, ou par ultrasons), la densité de l'œuf qui est indicative de la quantité de coquille par rapport aux autres composants de l'œuf (Olsson, 1934) et le test de déformation non destructif de la coquille qui mesure la rigidité statique (K_{stat}). Ce dernier paramètre évalue la capacité de la coquille à résister à la flexion ou déflexion sous l'action d'une force non destructive (maximum de 10 N). Toutes ces techniques sont lentes, destructives ou subjectives aussi des recherches ont été conduites pour développer des méthodes permettant une estimation rapide, objective et non destructive de la résistance mécanique de la coquille. Deux techniques prometteuses sont discutées ci-dessous.

2.1. Analyse des vibrations : notion de rigidité dynamique (K_{dyn})

Coucke (1998), Coucke et al. (1999), De Ketelaere et De Baerdemaeker (2000) et De Ketelaere et al. (2002) ont analysé les vibrations d'un œuf ayant subi un impact pour définir la fréquence de résonance. Cette fréquence de résonance a ensuite été utilisée pour estimer la résistance de la coquille sur des œufs intacts. Dans ce but, Coucke (1998) a modélisé l'œuf en tant que système « masse-ressort » et a défini un nouveau paramètre de résistance de la coquille, appelé rigidité dynamique (K_{dyn}). Le terme « dynamique » a été choisi pour souligner que la résistance de la coquille a été mesurée dans des conditions dynamiques, c'est-à-dire après impact. L'équipement utilisé (figure 1) est un équipement de laboratoire composé de deux rouleaux qui font tourner l'œuf autour de son axe longitudinal, d'un petit marteau constitué d'une barre légère pour impacter l'œuf et d'un microphone enregistrant la vibration de ce dernier. Pendant sa rotation, l'œuf est impacté 4 fois au niveau de son équateur. La figure 2 présente un signal acoustique type d'un œuf en fonction du temps, enregistré après un impact léger.



GAUCHE : Figure 1. Équipement de laboratoire analysant le comportement vibratoire d'un œuf après un impact léger, utilisé pour détecter des fissures dans la coquille et définir la rigidité dynamique (K_{dyn}) d'un œuf intact. L'appareil est composé de : (a) microphone ; (b) détecteur de présence de l'œuf : source IR (b.1) et récepteur (b.2) ; (c) rouleaux de rotation ; (d) excitateur constitué d'un petit marteau et d'une bobine magnétique.

DROITE : Figure 2. Réponse acoustique d'un œuf après impact.

Les signaux obtenus au fil du temps sont utilisés pour calculer les spectres de fréquence par transformation de Fourier. On obtient ainsi la fréquence de résonance dominante (RF) de l'œuf intact (figure 3), à partir de laquelle la rigidité dynamique est calculée comme suit :

$$K_{dyn} = A \cdot EW \cdot RF^2$$

avec EW correspondant à la masse de l'œuf exprimée en kg, A une constante (considérée égale à 1) et RF la fréquence de résonance exprimée en Hz. On calcule K_{dyn} à partir de 4 mesures de fréquence réalisées à 4 endroits différents, pris à distance égale au niveau de l'équateur de l'œuf. La valeur moyenne définit la rigidité dynamique finale.

Coucke (1998) et Coucke et al. (1999) ont trouvé une corrélation de 0,71 entre les rigidités statique (K_{stat}) et dynamique (K_{dyn}). La corrélation observée par ces auteurs entre l'épaisseur de la coquille et K_{dyn} était de 0,60. De Ketelaere et De Baerdemaeker (2000) et De Ketelaere (2002) ont ensuite développé le modèle initial

« masse-ressort » en incorporant l'amortissement qui fournit des informations supplémentaires. Cela a été possible en combinant mesures dynamiques et statiques, mais il reste toujours des points discutables. De plus, ils ont constaté que la combinaison des mesures dynamiques et statiques était dépendante de la forme de l'œuf. Un modèle de régression linéaire multiple a été construit en utilisant la rigidité dynamique, l'amortissement et l'indice de forme des œufs comme variables explicatives ; ce modèle a permis de prédire la rigidité statique avec une corrélation de 0,90. Les mêmes variables explicatives ont été utilisées pour estimer l'épaisseur de la coquille et sa résistance mécanique à la rupture, mais les corrélations étaient alors inférieures (respectivement 0,78 et 0,64).

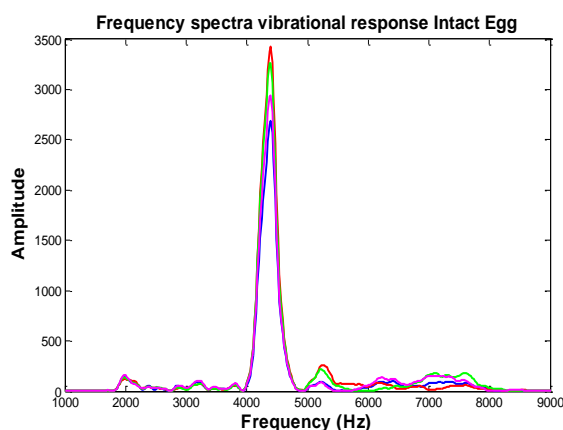


Figure 3. Spectres de fréquence d'un œuf intact ; dans cet exemple, l'œuf montre une fréquence de résonance typique d'environ 4300 Hz.

Une question reste discutée : faut-il comparer les nouveaux indicateurs, comme K_{dyn} , avec les indicateurs plutôt classiques, comme K_{stat} , ou faut-il n'utiliser que les nouveaux indicateurs ? Des résultats récents obtenus par différents laboratoires ont présenté K_{dyn} comme étant une mesure intéressante et pratiquement satisfaisante pour évaluer la résistance mécanique de la coquille. En effet, les œufs présentant un K_{dyn} plus élevé ont montré un risque plus faible de fissuration tout au long du processus de production (Bain et al., 2006 ; Mertens et al., 2006). Par ailleurs, K_{dyn} peut être utilisé dans la surveillance en élevage de la qualité des œufs, en détectant par exemple une baisse de la résistance de la coquille suite à différentes contraintes ou maladies (Lin et al., 2004 ; Mertens et al., 2007). Les études bactériologiques consacrées à la pénétration de *Salmonella Enteritidis* dans les œufs ont également montré que les œufs avec un K_{dyn} élevé sont moins contaminés (Messens et al., 2007). Ces résultats confirment donc l'utilité du K_{dyn} dans les programmes de sélection, d'autant que l'héritabilité génétique de ce paramètre est significativement plus importante que celles associées aux mesures traditionnelles de résistance de la coquille (Bain et al., 2003 ; Dunn et al., 2005).

2.2. Rigidité de Hertz (K_H)

Plus récent, De Ketelaere et al. (2010a,b) a proposé une nouvelle mesure de rigidité basé sur la théorie de contact de Hertz. En général, cette théorie décrit le comportement de deux objets qui entrent en collision entre eux. Dans notre cas, les deux objets sont l'œuf et une petite bille en acier. L'équipement pour faire la test est la même que celui qui est utilisé dans les machines de tris de MOBA BV (Barneveld, Pays-Bas) (voir paragraphe IV) et qui est présenté en figure 4 (voir aussi la figure 7). Huit mesures consécutives sont exécutés par œuf à des locations équidistantes autour de l'équateur. En utilisant la théorie de Hertz, la rigidité des deux objets, en fait l'œuf et la bille, peut être défini comme :

$$K_H = \left(\frac{c}{\tau}\right)^{\frac{5}{2}} v_{n_0}^{\frac{1}{2}} m$$

avec c correspondant à une constante égale à 3.2145, v_{n_0} la vitesse à l'impact (m/s), τ le temps de contact (s) et m la masse effective du système (kg). De Ketelaere et al. (2010b) a exploré la relation entre K_H et K_{stat} sur un échantillon de 150 œufs, donnant une corrélation de 0.93. Ces résultats montrent que la mesure de K_H permet de déterminer K_{stat} par une méthode rapide, objective et non destructive.

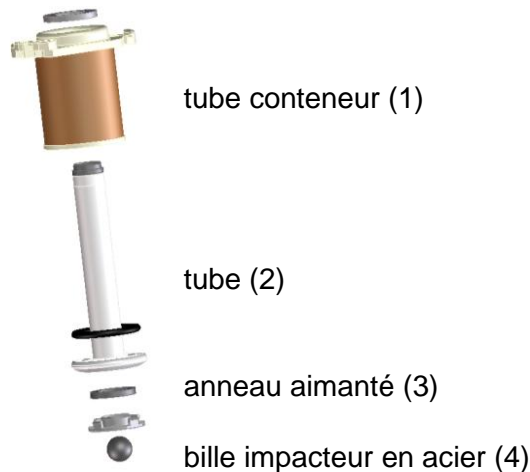


Figure 4: L'impacteur pour mesurer la rigidité de Hertz. L'impacteur est composé d'un tube en plastique avec un anneau aimanté au niveau de son extrémité basse. Le champ magnétique intègre la bille en acier. Photo fourni par Moba BV.

3. Détection des coquilles fêlées par analyse des vibrations acoustiques

La méthode classique pour détecter des œufs fêlés est le mirage. Lors de l'opération de mirage, une lumière forte est focalisée sur l'œuf qui est visuellement inspecté, de préférence dans un environnement obscur. Les œufs fêlés apparaissent plus translucides dans la région des fêlures. De nos jours, la cadence élevée des machines de tri modernes a rendu l'opération de mirage moins fiable. C'est pourquoi des méthodes alternatives ont été développées, comme par exemple la détection des fissures par analyse des vibrations acoustiques.

Les défauts de la coquille peuvent être détectés par l'analyse de la réponse acoustique (vibration) de l'œuf après un impact léger. L'équipement utilisé pour cette évaluation est le même que celui décrit au paragraphe II.2.1. En raison de la symétrie axiale d'un œuf ayant une coquille intacte, la réponse acoustique est presque indépendante de la zone d'impact (excitation) tout au long de l'équateur de l'œuf (Coucke, 1998 ; De Ketelaere et al., 2000). Les coefficients de corrélation de Pearson sont utilisés pour quantifier la similitude entre deux spectres de fréquence : un coefficient de Pearson égal à 1 correspond à deux spectres identiques ; des valeurs inférieures à 1 correspondent à des spectres d'allures différentes. Comme cela a été exposé pour la mesure de la solidité de la coquille, chaque œuf est impacté 4 fois (tous les 90° autour de l'équateur). Ces mesures multiples sont utilisées afin de déterminer les coefficients de corrélation de Pearson de six combinaisons différentes de vecteurs de données, à savoir (1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,4) et (3,4). Si le coefficient de corrélation le plus petit est inférieur à une valeur seuil (habituellement 0,9 ou 0,95), l'œuf est considéré comme fêlé (De Ketelaere et al., 2000). Sur la base des signaux enregistrés au fil du temps (cf. figure 2), les spectres de fréquence sont établis et interprétés pour déclarer l'œuf « intact » ou « fêlé ». La figure 15 offre des exemples de spectres de fréquence respectivement pour un œuf intact (figure 5a) et pour un œuf dont la coquille est endommagée (figure 5b).

Il a été démontré que cette technique détecte plus de 90 % des œufs fêlés, et que les fausses alarmes (œufs intacts injustement classés comme endommagés) sont inférieures à 1 %. La technique est par ailleurs rapide : une vibration de l'œuf dure typiquement 10 ms et le nombre de mesures nécessaires est réduit, ce qui fait de cette technique une alternative idéale aux méthodes existantes.

Cho et al. (2000) ont utilisé une méthode similaire de détection des fissures, mais en appliquant un modèle de régression multiple et une analyse discriminante aux informations offertes par les spectres de fréquence. Ces auteurs notent un degré de détection correct (œufs fêlés effectivement détectés comme endommagés) de 94 %, mais avec un taux de faux positifs de 4 %. Jindal et Sritham (2003) ont également utilisé des techniques basées sur la vibration après impact afin d'évaluer les défauts de la coquille. Ils ont utilisé des réseaux de neurones artificiels pour classer les œufs, à partir de 8 mesures par œuf. Ils indiquent un niveau de détection correcte de près de 99 %, mais avec plus de 10 % de faux positifs. Pour la détection des coquilles fêlées, le pourcentage de faux positifs et le pourcentage de détection correcte sont en fait deux aspects antagonistes : en acceptant un niveau plus élevé de faux positifs, on augmente le niveau de détection d'œufs fêlés. Mais la comparaison des résultats entre les différentes études devient impossible quand les pourcentages de faux positifs diffèrent. Afin de bien estimer le potentiel réel d'un système de détection, il faut donc choisir un niveau de fausses alarmes qui corresponde aux contraintes de production (par exemple inférieur à 0,5 %) et déterminer, dans ces conditions, la capacité de détection des œufs réellement fêlés.

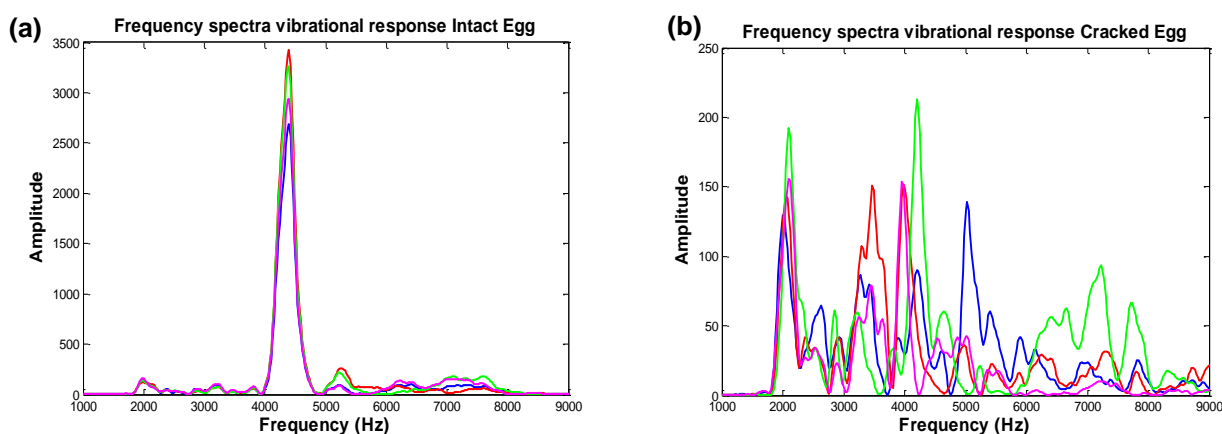


Figure 5. Spectres de fréquence types : (a) spectre d'un œuf intact (la corrélation minimale entre les 4 spectres est ici de 0,99, donc supérieure au seuil de 0,90) ; (b) spectre d'un œuf fêlé (la corrélation minimale entre les 4 spectres est ici de -0,04, donc inférieure à la valeur seuil de 0,90).

III. QUALITE INTERNE

La qualité interne des œufs de table est difficilement mesurable sans casser la coquille. Or, la détection et l'évaluation d'aspects de qualité interne est particulièrement importante car le consommateur est très sensible aux différents défauts que sont les taches de sang, les taches de viande, les décolorations locales du jaune d'œuf, les jaunes cassés...

1. Qualité du blanc d'œuf

La qualité de l'albumen est principalement associée à la quantité de blanc épais, mesurée par les unités Haugh. (Haugh, 1937), l'a mesuré traditionnellement à l'aide d'un micromètre tripode. Bien que les unités Haugh soient encore beaucoup utilisées, il serait intéressant de pouvoir relier les résultats de mesures non destructives (optiques ou autres) à des paramètres d'évaluation de la qualité de l'albumen tels que la viscosité ou le pH. Une revue présentant de telles méthodes a été réalisée (De Ketelaere et al., 2004).

1.1. Spectroscopie VIS/NIR

Comme pour le couleur d'œuf (voir paragraphe II.1.1), cette technique est aussi utilisée pour prédire la qualité du blanc d'œuf. Schmilovitch et al. (2002) ont déterminé le pH en utilisant des données spectrales en proche infra-rouge. Kemps (2006) a, quant à lui, tenté d'estimer la valeur d'unités Haugh et le pH en utilisant des données spectrales dans le visible et le proche infra-rouge. Mais cet auteur a constaté que les variations des spectres obtenus reflètent plutôt des modifications de la coquille que celles de la qualité de l'albumen.

1.2. Spectroscopie H-RMN

La résonance magnétique nucléaire (RMN) est un phénomène qui se produit quand les noyaux de certains atomes sont placés dans un champ magnétique statique et exposés à un 2nd champ magnétique oscillant. Les temps de relaxation longitudinale et transversale des atomes donnent des informations sur leur environnement chimique, donc sur les éventuelles modifications chimiques et physiques de l'échantillon étudié. Capozzi et al. (1999) et Schwägele et al. (2001) ont utilisé la spectroscopie H-RMN (RMN du proton) de basse résolution comme méthode non destructive pour déterminer la qualité des œufs. Des variations des temps de relaxation transversale ont été effectivement observées au cours du stockage des œufs. Ces auteurs ont pu par la suite montrer que ces modifications étaient provoquées par la liquéfaction croissante de l'albumen au cours du vieillissement des œufs.

1.3. Propriétés diélectriques

Les propriétés diélectriques d'un matériau varient avec l'humidité, la densité, la composition et la structure, l'activité de l'eau, la température et la fréquence du champ appliqué. Les appareils et instruments de mesure les plus utilisés pour évaluer les propriétés diélectriques des produits alimentaires sont le condensateur à plaques parallèles, la sonde coaxiale, le guide onde, la structure de résonance, l'inductance, la capacité électrique, l'ohmmètre, l'analyseur d'impédance et l'analyseur de réseau scalaire et vectoriel (Ragni et al., 2006, 2007).

Les premières recherches sur les propriétés diélectriques des œufs ont été introduites par Romanoff et Romanoff (1949). Plus récemment, Williams et al. (1997) ont montré que l'index de la méthode TOBEC (Total Body Electric Conductivity) est particulièrement utile et exact pour prédire le poids de l'œuf et de certaines de ses composantes (poids de l'albumen et teneur en eau). Plus récemment, Ragni et al. (2006, 2007) ont tenté de prédire plusieurs indices de qualité liés à la fraîcheur de l'œuf (parmi lesquels les unités Haugh et la hauteur de la chambre à air) à partir des propriétés diélectriques. Leurs résultats montraient un R^2 de 0,640 pour les unités Haugh et de 0,797 pour la hauteur de la chambre à air.

Bien que l'implantation de ces techniques dans les centres de tri paraisse possible, aucune application n'a réussie à donner des résultats assez fiables aussi des recherches supplémentaires doivent être effectuées avant de pouvoir appliquer ces méthodologies.

2. Détection des inclusions

Les inclusions indésirables, telles que les taches de sang et de viande, sont classiquement détectées par mirage des œufs dans une cabine obscure comme pour la détection des fêlures de coquilles. Mais depuis longtemps, des méthodes alternatives ont été envisagées, notamment les techniques de spectroscopie visible et proche infra-rouge (cf. paragraphe II.1.1). De telles méthodes ont été développées dès 1953 avec l'étude de Brant et al. qui ont été les premiers à utiliser le spectre de lumière transmise par un œuf dans le but de détecter les taches de viande dans l'albumen. L'hémoglobine, pigment présent dans le sang, offre 3 bandes d'absorption (415, 539 et 577 nm). La protoporphyrine, pigment responsable de la couleur des coquilles brunes, présente aussi 3 bandes d'absorption, dont 2 à des longueurs d'onde différentes (539, 589 et 643 nm). En dessous de 500 nm, la coquille absorbe la quasi-totalité de la lumière. La bande d'absorption

à 539 nm est commune à l'hémoglobine et à la porphyrine. Par conséquent, seule la bande à 577 nm est utilisable pour la détection du sang (Brant et al., 1953). Cependant, à cette longueur d'onde, les protoporphyrines peuvent interférer car la bande d'absorption à 589 nm est très proche de 577 nm (Gielen et al., 1979). La fiabilité de détection des taches de sang dépend donc fortement de la couleur de la coquille : pour des œufs blancs, on a une très bonne détection. Par contre, pour les œufs bruns, la qualité de la détection est nettement inférieure, du fait des propriétés optiques similaires de l'hémoglobine et des protoporphyrines. L'utilisation d'une longueur d'onde de référence ne permet pas de résoudre complètement ce problème (Gielen et al., 1979). Quelques détecteurs peuvent adapter leur valeur seuil sur la base d'une mesure de couleur de la coquille, mais la détection reste toujours difficile. Des recherches supplémentaires sont donc encore nécessaires pour développer un système fiable.

IV. EVALUATION DE LA QUALITE DES ŒUFS DANS LES CENTRES DE TRI

Le marché des systèmes de tri automatisés est dominé par trois acteurs principaux : Moba BV (Barneveld, Pays-Bas), Diamond Automations Inc. (Michigan, Etats-Unis) et Sanovo Staalkat Group (Odense, Danemark et Aalten, Pays-Bas). Les techniques utilisées par ces sociétés pour évaluer la qualité de l'œuf sont présentées ci-après.

1. Détection de fissures

Les systèmes mécaniques de détection rapide et non destructive ont déjà prouvé leur efficacité pour la détection des fissures de coquille dans un contexte industriel. Dans deux des applications commerciales, un « excitateur » impacte la coquille. La combinaison de l'amplitude des rebonds et/ou du nombre de rebonds de l'« excitateur » sert d'indicateur de l'intégrité de la coquille : une coquille intacte permet à l'« excitateur » d'exécuter plusieurs rebonds élastiques de grande amplitude ; aux alentours d'une fissure, l'élasticité de la coquille est fortement affectée aussi le rebond est sévèrement amorti. En répétant cette action à différents endroits de l'œuf, une cartographie de l'état mécanique de la coquille peut être établie. Le rôle d'« excitateur » peut être rempli par un petit marteau (figure 6), par une bille métallique introduite dans une sonde électromagnétique (Moayeri, 1996 ; figure 7), ou par l'œuf lui-même. Dans ce dernier cas, l'œuf tourne sur de petits objets métalliques en-dessous desquels se trouve un capteur piézoélectrique (Bliss, 1973).



GAUCHE : Figure 6. Technique de détection des fissures développée par la Sanovo Staalkat Group (www.staalkat.com/ www.sanovoeng.com)

DROITE : Figure 7. Technique de détection des fissures développée par Moayeri (1996) (www.moba.nl)

Ces méthodes offrent uniquement des informations locales concernant la résistance mécanique de la coquille, ce qui signifie qu'il faut évaluer chaque œuf en plusieurs endroits (16 à 32 tests par œuf) afin d'arriver à une estimation satisfaisante. L'efficacité de la détection varie entre 70 % et 85 %, tandis que le pourcentage de faux positifs se situe entre 0,3 % et 1 % selon les données fournies par les équipementiers. Ces valeurs correspondent à des tests effectués en régime industriel pour un grand volume d'œufs.

2. Détection de salissures

Les tests ont montré que le mirage n'est pas très efficace pour des œufs non lavés. Ce sont en particulier les œufs bruns qui posent problème, à cause de la grande variabilité de couleur de leurs coquilles. C'est pourquoi les équipementiers ont développé des technologies visant à automatiser l'inspection visuelle des œufs.

Pour la détection des salissures, on utilise classiquement des caméras digitales (Goodrum et Elster, 1992). Une illumination uniforme des œufs, suivie d'un traitement digital adéquat, permet non seulement de détecter les salissures sur les œufs, mais aussi de distinguer les différents types de salissures (matières fécales, jaune d'œuf, sang...) et d'évaluer leur importance (taille). Cette technologie est actuellement proposée par les plus grands fabricants de machines de tri tels que Moba (figure 8), Diamond et Sanovo Staalkat Group.

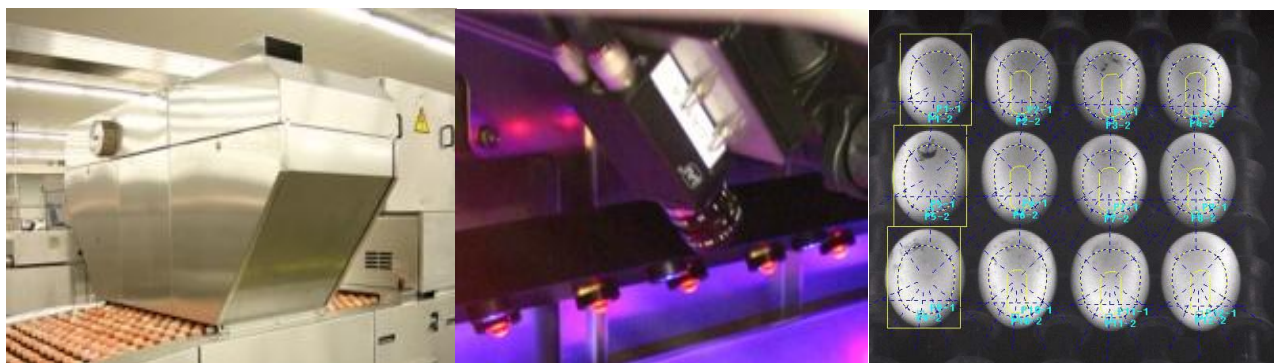


Figure 8. Système de détection de salissures commercialisé par Moba BV : (a) vue d'ensemble sur la ligne de tri ; (b) tous les œufs sont éclairés par des sources de type LED et plusieurs caméras prennent des images ; (c) logiciel d'imagerie pour la détection des salissures. (www.moba.nl)

3. Qualité interne

Les machines de tri actuellement commercialisées offrent la possibilité de détecter certaines anomalies internes à l'œuf. Un des points critiques est la présence d'éventuelles taches de sang. Le principe de leur détection a été présenté ci-dessus (cf. paragraphe III.2).

4. Couleur de la coquille

Si on veut mesurer la couleur de la coquille en ligne, la technique de réflectométrie peut être utilisée. La couleur de la coquille est alors mesurée par la lumière reflétée à trois bandes de longueur d'onde spécifiques, correspondant aux longueurs d'onde de la lumière rouge, verte et bleue. Ces trois valeurs sont alors combinées pour le calcul d'une valeur spécifique selon le type d'application, et qui fournit des renseignements sur la couleur de la coquille d'œuf (Wei et Bitgood, 1989). On peut également faire appel au

rapport entre la quantité de lumière reflétée à une longueur d'onde spécifique (influencée par les protoporphyrines par exemple) et une longueur d'onde de référence qui n'est pas perturbée par la couleur de la coquille.

V. UN SYSTEME INTELLIGENT POUR OPTIMALISER LA PRODUCTION

Le but final de développer de nouvelles techniques rapides, objectives et non-destructives pour mesurer les différents aspects de la qualité d'œuf est leur implantation dans les centres de tri pour évaluer la qualité de chaque œuf. Cette masse de données sert largement au management pour surveiller la performance des poules. L'enregistrement des données quotidiennes rend possible un suivi continu correspondant aux principes de *Control Synergétique* (Synergistic Control, SGC) qui est une combinaison des techniques de *Contrôle du Processus de type Ingénierie* (Engineering Process Control, EPC) et du *Contrôle du Processus de type Statistique* (Statistical Process Control, SPC). Mertens et al. (2008, 2009) et Mertens (2009) ont décrit cette procédure innovante pour la production de poules pondeuses. Le résultat de cette procédure est un graphique, en fait une *carte de contrôle*, qui indique si la mesure d'un paramètre de production (par exemple la consommation de nourriture, la production total d'œufs,...) ou de qualité (le poids de l'œuf, la solidité de la coquille,...) correspond bien aux données attendues (historiques) ou s'il y a une abaissement ou une augmentation de celles-ci.

La procédure de SGC est expliquée en utilisant l'exemple d'une bande de poules expérimentales (Isa Brown en cages) qui étaient soumises à trois incidents provoqués, sous forme de stress de chaleur (32°C pour 8 jours) au cours de leur période productive. Le K_{dyn} (voir paragraphe II.2.1) de chaque œuf a été enregistré quotidiennement. La carte de contrôle est présentée en figure 9.

Sur la carte de contrôle, les trois stress sont clairement constatés. Les stress ont été initiés aux jours de ponte (DOL) correspondant à 109, 228 et 286 jours. La carte de contrôle signale des alarmes (voir graphique inférieur) résultant de ces stress aux jours de ponte 111, 230 et 287, donc en moins de deux jours après introduction du stress. Les alarmes sont générées du fait d'une solidité diminuée. D'autres alarmes sont signalées par le dispositif au début de la période productive alors qu'aucune provocation expérimentale n'avait été introduite. Les alarmes de DOL 41 jusqu'à 43 n'ont pas de cause clairement identifiée et pourraient résulter d'une imprécision des mesures. Les alarmes correspondant aux jours de ponte 79 jusqu'à 78 résultent d'une infection grave de poux (*Dermanyssus gallinae*), à l'origine d'une anémie des poules.

L'utilisation des enregistrements quotidiens de K_{dyn} pour surveiller la qualité de la coquille des œufs, permet de signaler rapidement à l'éleveur des problèmes, avant même qu'il y ait effectivement plus de fêlures. Par ailleurs, les résultats de Bain et al. (2006) et Mertens et al. (2005) concernant la prédiction du risque de rupture à partir du cours de l'acheminement des œufs pour leur commercialisation à base de K_{dyn} , donnent la possibilité de faire rapidement une discrimination entre les œufs assez solides et les œufs fragiles. Lorsque les œufs fragiles ont un risque de rupture élevés, on pourrait les trier précocement pour les diriger vers la casserie.

La procédure de contrôle synergétique peut être développée pour tous les paramètres de la production d'œufs : le pourcentage de ponte, la consommation d'eau et d'aliment, le poids des poules, leur mortalité, le pourcentage œufs de deuxième choix, le poids des œufs et la solidité des œufs (K_{dyn}). Plus d'information sur ce sujet peuvent être trouvée dans le travail de Mertens (2009) et de Mertens et al. (2008, 2009).

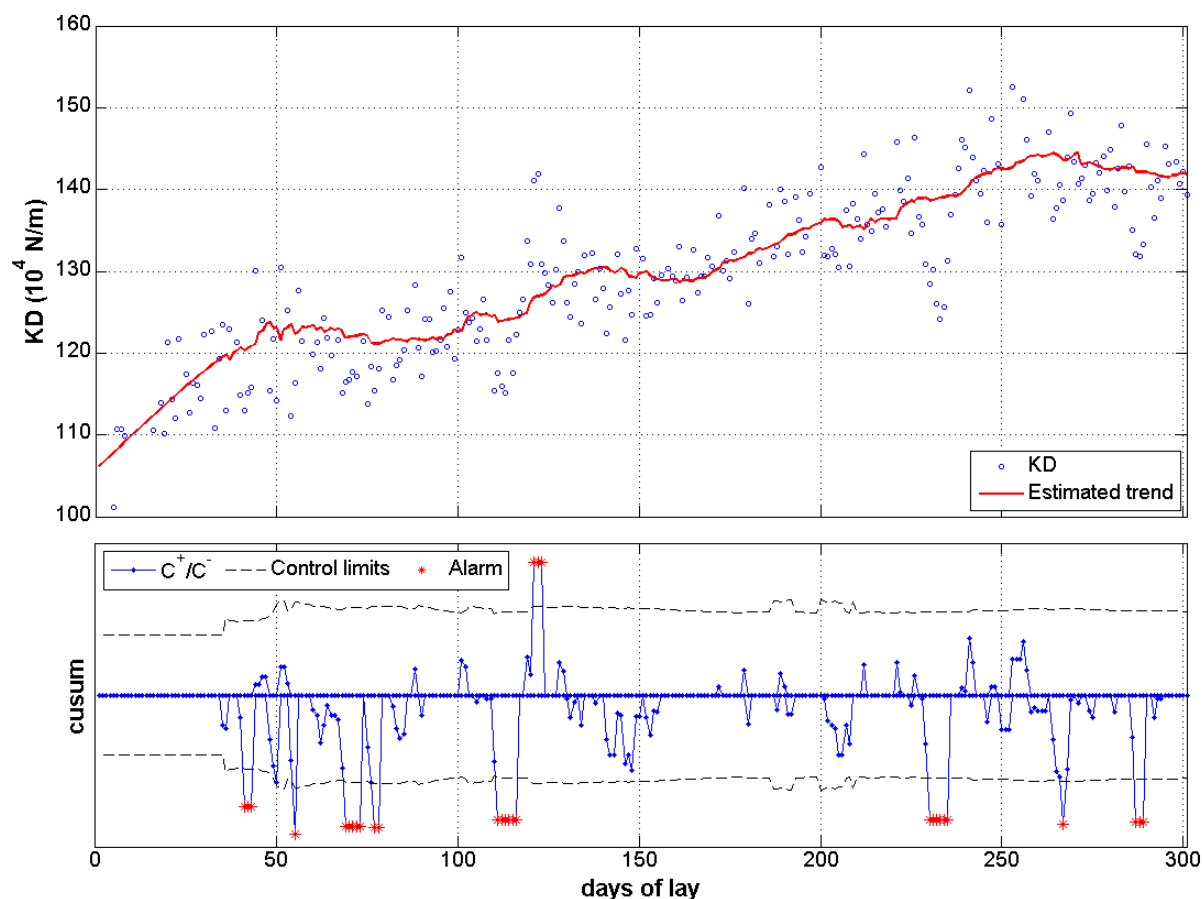


Figure 9. Carte de contrôle de la rigidité dynamique (K_{dyn}) moyenne en fonction de l'âge des poules (days of lay). Les poules ont été soumises à trois stress de chaleur (32°C pour 8 jours : les lignes verticales indiquent le temps des stress). La graphique en haut (a) montre le tracé de la K_{dyn} moyenne en fonction de l'âge des poules et la courbe de référence. La graphique en bas (b) montre les alarmes des calculs de cusum (cumulative sum, voir Mertens (2009)) qui indiquent que les enregistrements de K_{dyn} sont hors des valeurs attendues normales.

VI. CONCLUSION

Il y a un grand nombre de publications sur le développement des techniques rapides, objectives et non destructives pour mesurer différents aspects de la qualité des œufs de consommation. Beaucoup de techniques sont suffisamment intéressantes pour être implantée dans les machines de tri. Si l'enregistrement de chaque œuf peut être réalisée, la procédure de Control Synergétique permet de bien valoriser l'information disponibles parmi les masses de données de contrôle de la qualité et de surveiller la production dans les fermes de poules. Cependant, la fiabilité des machineries de tri équipées de systèmes pour la détection des fêlures et des salissures de coquille et pour la détection d'inclusions ou la mesure de la couleur des œufs doit encore à être améliorée.

RÉFÉRENCES

- Bain MM, Dunn IC, Wilson PW, Joseph N, De Ketelaere B, De Baerdemaeker J, Waddington D (2006) Probability of an egg cracking during packing can be predicted using a simple non-destructive acoustic test. *Br Poult Sci.* **47**: 462-9.
- Bain M, Dunn IC, Edmond A, Wilson PW, Joseph N, Waddington D, Solomon S, De Ketelaere B, De Baerdemaeker J and Preisinger R. (2003) Marker assisted selection to improve eggshell quality: establishing the association between egg phenotypic traits and 'candidate genes'. *Proceedings of the WPSA conference, Ploufragan, France*: pp. 126-131.
- Bain, M (1990) *Eggshell strength: a mechanical/ultrastructural evaluation*. Ph.D. Thesis. University of Glasgow, Scotland.
- Bamelis F, Kemps B, Mertens K, Tona K, De Ketelaere B, Decuyper E, De Baerdemaeker J (2004) Non-destructive measurements on eggs during incubation. *Avian Poult Biol Rev.* **15**: 150-159.
- Bamelis F (2003) *Non invasive assessment of eggshell conductance and different developmental stages during incubation of eggs*. Ph. D. thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Brant AW, Norris KH & Chin G (1953) A spectrophotometric method for detecting blood in white-shell eggs. *Poult Sci.* **32**: 357-363.
- Butcher GD and Miles RD (2003) Factors causing poor pigmentation of brown-shelled eggs. *Document VM94, series of the Veterinary Medicine-Large Animal Clinical Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*. pp.4.
- Capozzi F, Cremonini MA, Luchinat C, Placucci G, Vignali C (1999) A low frequency 1H-NMR external unit for the analysis of large food stuff samples. *J Magn Res.* **138**: 277-280.
- Coucke P, Dewil E, Decuyper E, De Baerdemaeker J (1999). Measuring the mechanical stiffness of an eggshell using resonant frequency analysis. *Br Poult Sci.* **40**: 227-32.
- Cho HK, Choi WK, Paek JH (2000) Detection of surface cracks in shell eggs by acoustic impulse method. *Transaction of the ASAE.* **43**(6): 1921-1926.
- Coucke P (1998) *Assessment of some physical egg quality parameters based on vibration analysis*. Ph.D. Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- De Ketelaere B, Mertens K, De Baerdemaeker J (2010a) Eggshell strength assessment using Hertz contact theory. Part I: Theory and applicability. *J Food Eng* Submitted.
- De Ketelaere B, Mertens K, De Baerdemaeker J (2010b) Eggshell strength assessment using Hertz contact theory. Part II: Implementation and validation. *J Food Eng* Submitted.
- De Ketelaere B, Bamelis F, Kemps B, Decuyper E, De Baerdemaeker J (2004) Non-destructive measurements of the egg quality. *W Poult Sci J.* **60**: 289-302.
- De Ketelaere B, Govaerts T, Coucke P, Dewil E, Visscher J, Decuyper E, De Baerdemaeker J (2002) Measuring the eggshell strength of 6 different genetic strains of laying hens: techniques and comparisons. *Br Poult Sci.* **43**: 238-244.
- De Ketelaere B, Coucke P, De Baerdemaeker J (2000) Eggshell crack detection based on acoustic resonance frequency analysis. *J Agric Eng Res.* **76**: 157-163.
- De Ketelaere B and De Baerdemaeker J (2000) PART II: Using high-resolution resonant frequency and damping estimators for the non-destructive, on-line determination of the eggshell strength. *Proceedings of the 1st international workshop on noise and vibration in agricultural and biological engineering*: pp 149-154.
- Dunn IC, Bain MM, Edmond A, Wilson PW, Joseph N, Solomon S, De Ketelaere B, De Baerdemaeker J, Schmutz M, Preisinger R, Waddington D (2005) Heritability and genetic correlation of measurements derived from resonant frequency analysis; a novel method of determining egg shell quality in domestic hens. *Br Poult Sci.* **46**: 280-6.
- Giangiacomo R and Dull GG (1986) NIR spectrophotometric determination of individual sugars in aqueous mixtures. *J Food Sci.* **51**: 679-683.
- Gielen RMAM, De Jong LP, Kerkvliet HMM (1979) Electro-optical blood-spot detection in intact eggs. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements.* **IM-28**(3): 177-183.
- Goodrum JW and Elster RT (1992) Machine Vision for Crack Detection in Rotating Eggs. *Transactions of the ASAE.* **35**(4): 1323-1328.
- Karoui R, Kemps B, Bamelis F, De Ketelaere B, Decuyper E, De Baerdemaeker J (2006) Methods to evaluate egg freshness in research and industry: A review. *Eur Food Res Tech.* **222**: 727-732.
- Haugh RR (1937) The Haugh unit for measuring egg quality. *U.S. Egg poultry Magazine.* **43**: 522-555, 572-573.
- Jindal VK and Sritham E (2003) Detecting Eggshell Cracks by Acoustic Impulse Response and Artificial Neural Networks. *ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, USA, 27-30 July, Paper Number 036170*.
- Kennedy GY and Vevers HG (1973) Eggshell pigments of the Araucana fowl. *Comp Biochem Physiol.* **44B**: 11-25.
- Kemps, B. (2006) *VIS/NIR spectroscopy for the assessment of internal egg quality*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, pp.178.

- Lang MR and Wells JW (1987) A review of eggshell pigmentation. *W Poult Sci J.* **43**: 238-246.
- Lin H, Mertens K, Kemps B, Govaerts T, De Ketelaere B, De Baerdemaeker J, Decuyper E and Buyse J (2004) New approach of testing the effect of heat stress on eggshell quality: mechanical and material properties of eggshell and membrane. *Br Poult Sci.* **45**: 476-82.
- Martinez-de la Puente J, Merino S, Moreno J, Tomas G, Morales J, Lobato E, Carcia Fraile S, Martinez J (2007) Are eggshell spottiness and colour indicators of health and condition in blue tits (*Cyanistes caeruleus*)? *J Avian Biol.* **38**: 377-384.
- Mertens K, Vaesen I, Löffel J, Kemps B, Kamers B, Perianu C, Zoons J, Darius P, Decuyper E, De Baerdemaeker J, De Ketelaere B (2010a) The transmission color value: A novel egg quality measure for recording shell color used for monitoring the stress and health status of a brown layer flock. *Poult Sci.* **89**: 609-617
- Mertens K, Bain M, Perianu C, De Baerdemaeker J, Decuyper E, De Ketelaere B (2010b) *Qualité physico-chimique de l'oeuf de table*. In: Nau F, Guérin-Dubiard C, Baron F (Ed.), *L'oeuf et les ovoproduits - Science et technologie Tome I Production et qualité de l'oeuf*. Lavoisier, Editions Tec & Doc.
- Mertens K (2009) *An intelligent system for optimizing the production and quality of consumption eggs based on synergistic control*. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Mertens K, Vaesen I, Löffel J, Kemps B, Kamers B, Zoons J, Darius P, Decuyper E, De Baerdemaeker J, De Ketelaere B (2009) An intelligent control chart for monitoring of autocorrelated egg production process data based on a synergistic control strategy. *Comp Electron Agric.* **69**: 100-111.
- Mertens K, Vaesen I, Löffel J, Ostyn B, Kemps B, Kamers B, Bamelis F, Zoons J, Darius P, Decuyper E, De Baerdemaeker J, De Ketelaere B (2008) Data-based design of an intelligent control chart for the daily monitoring of the average egg weight. *Comp Electron Agric.* **61**: 222-232.
- Mertens K, De Ketelaere B, Bamelis F, Ostyn B, Kemps B, Perianu C, Vaesen I, Zoons J, Decuyper E and De Baerdemaeker J (2007) Using the dynamical stiffness (Kdyn) in an egg quality monitoring scheme. *Proceedings of the XII European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products, 2-5 September 2007, Prague, Czech Republic*.
- Mertens K, Bamelis F, Kemps B, Kamers B, Verhoelst E, De Ketelaere B, Bain M, Decuyper E, De Baerdemaeker J (2006) Monitoring of Eggshell Breakage and Eggshell Strength in Different Production Chains of Consumption Eggs. *Poult Sci.* **85**: 1670-1677.
- Mertens K, De Ketelaere B, Kamers B, Bamelis FR, Kemps BJ, Verhoelst EM, De Baerdemaeker JG and Decuyper EM (2005) Dirt Detection on Brown Eggs by Means of Color Computer Vision. *Poult Sci.* **84**: 1653-1659.
- Messens W, Grijspeerdt K, De Reu K, De Ketelaere B, Mertens K, Bamelis F, Kemps B, De Baerdemaeker J, Decuyper E and Herman L (2007) Eggshell penetration of various types of hens' eggs by *Salmonella enterica* serovar Enteritidis. *J Food Prot.* **70**: 623-628.
- Moayeri H (1996) Probe, device and method for testing eggs. U.S. Patent 5.728.939.
- Moreno J, Lobato E, Morales J, Merino S, Tomas G, Martinez-de la Puente J, Sanz J, Mateo R, Soler J (2006). Experimental evidence that egg color indicates female condition at laying in a songbird. *Behav Ecol.* **17**: 651-655.
- Olsson N (1934) *Studies on specific gravity of hen's egg. A method for determining the percentage of shell on hen's eggs*. Otto Harrassowitz, Leipzig.
- Ragni L, Al-Shami A, Mikhaylenko G, Tang J (2007) Dielectric characterization of hen eggs during storage. *J Food Eng.* **82**: 450-459.
- Ragni L, Gradari P, Berardinelli A, Giunchi A, Guarnieri A (2006) Predicting quality parameters of shell eggs using a simple technique based on the dielectric properties. *Biosyst Eng.* **94**(2): 255-262.
- Romanoff AL and Romanoff AJ (1949). *The Avian Egg*. Wiley, New York, USA.
- Siefferman L, Navara K, Hill G (2006) Egg coloration is correlated with female condition in eastern bluebirds (*Sialia sialis*). *Behav Eco. Sociobiol.* **59**: 651-656.
- Schmilovitch Z, Hofmann A, Egozi H and Klein E (2002) Determination of egg freshness by NNIRS (Near-Near Infrared Spectroscopy). *Proceedings of the AgEng Conference, Budapest, Hungary*. Paper Number 02-AP-023.
- Schwagele F, Poser R, Krockel L (2001) Application of low-resolution NMR spectroscopy of intact eggs - Measurement of quality determining physical characteristics. *Fleischwirtschaft.* **81**(10): 103-106.
- Wei R and Bitgood JJ (1989) A new objective measurement of eggshell color. 1. A test for potential usefulness of two color measuring devices. *Poult Sci.* **69**: 1175-1780.
- Williams D, Monaghan P, Mitchell PI, Scott I, Houston DG, Ramsey S, Ensor K (1997) Evaluation of a non-destructive method for determining egg composition using total body electrical conductivity (TOBEC) measurements. *J Zool.* **243**(3): 611-622.
- Williams PC and Norris KH (1987) Near infrared technology in the agricultural and food industries. *American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN, USA*. pp. 169-180, 201-208.